ASSOCIATION FRANÇAISE

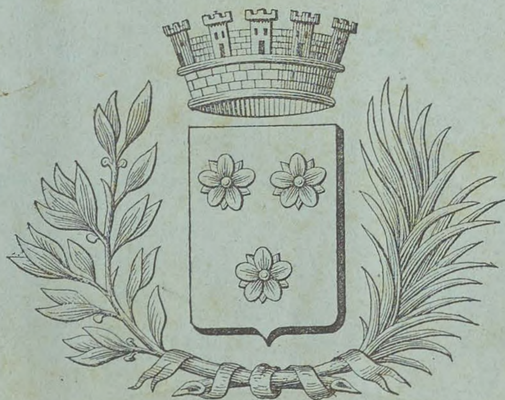
POUR

L'AVANCEMENT DES SCIENCES

CONGRÈS DE GRENOBLE

1885

M Edmond Fuchs
2e Note sur le Gîte de Cuivre du Boleo



PARIS
AU SECRÉTARIAT DE L'ASSOCIATION
4, rue Antoine-Dubois, 4.
(PLACE DE L'ÉCOLE-DE-MÉDECINE.)

ASSOCIATION FRANÇAISE

POUR L'AVANCEMENT DES SCIENCES

Congrès de Grenoble. — 1885.

M. Edmond FUCHS

Ingénieur en chef des Mines.

NOTE SUR LES GISEMENTS DE CUIVRE DU BOLEO

— Séance du 20 août 1885 —

INTRODUCTION

L'industrie du cuivre accomplit depuis quelque temps une évolution graduelle et rapide, qui réduit actuellement la valeur commerciale de ce métal à la moitié à peine de ce qu'elle était il y a un petit nombre d'années.

Cette évolution a été la conséquence de la découverte et de la mise en valeur de gîtes de dimensions exceptionnelles, susceptibles de faire face à des productions industriellement illimitées. Leur exploitation s'est, par suite, effectuée dans des conditions économiques inconnues avant cette époque, parce qu'elles ne pouvaient être réalisées aussi longtemps que les gisements, qui concouraient à l'alimentation du marché, n'avaient qu'une importance secondaire ou n'étaient exploités que sur une petite échelle.

La disparition de ces exploitations de second ordre et la concentration de l'industrie du cuivre dans les grands centres du Sud de l'Espagne, du Montana, du lac Supérieur, du Chili et de l'Arizona, etc., ont créé un nouvel équilibre commercial, et ont ramené la valeur marchande du cuivre au taux réduit qui correspond aux conditions d'exis-

tence et de travail de ces grands centres miniers, et qui persistera, par suite, aussi longtemps que durera leur prospérité.

A ce titre, la découverte d'un centre de production de premier ordre présente un intérêt tout spécial, et cet intérêt s'accroît encore lorsque le gîte correspondant affecte une allure et des caractères qui n'avaient point été rencontrés jusqu'ici.

Tel est le cas du gîte du Boleo, que nous avons eu l'occasion de visiter et d'étudier en février et mars 1885, en compagnie de M. le professeur James D. Hague, de New-York, avec la collaboration de M. Robellaz, ingénieur civil des mines, et de M. Lewis William, directeur de la fonderie de cuivre de Copper-Queen (Arizona). Avant notre visite, ce gîte avait été l'objet d'une série d'études remarquables, inaugurées par M. Tinoco, ingénieur mexicain, auquel on doit l'établissement de la belle carte topographique de la région, à l'échelle de 1/5.000, dont on trouvera plus loin une réduction à l'échelle de 1/40.000. (Pl. X.) Ces études ont ensuite été poursuivies, au double point de vue géologique et industriel, par M. Ed. Cumenge, ingénieur au corps des mines, et par M. de la Bouglise, ingénieur civil des mines, dont les travaux, aussi complets que variés, ont jeté une vive lumière sur cet intéressant district métallifère, et ont permis d'en analyser avec soin la richesse et la constitution.

I. APERÇU TOPOGRAPHIQUE.

La région de la Basse-Californie, à laquelle on a donné le nom de *Boleo* et qui renferme des gîtes cuivreux d'une grande importance, est située sur la rive occidentale du golfe de Californie (mer Vermeille) par 27° 25 de latitude nord et par 115° de longitude ouest, à 120 kilomètres au nord-nord-ouest du petit port de Muleje et en face de celui de Guaymas, sur la rive mexicaine, où aboutit le chemin de fer de la Sonora, rameau terminal, vers l'ouest, des voies ferrées du Mexique et des États-Unis. (Pl. X, fig. 2.)

Cette région occupe une surface grossièrement rectangulaire de 8 kilomètres sur 5, dont les deux grands côtés sont formés respectivement : par la mer au nord-est, et au sud-ouest par une grande faille sensiblement parallèle au rivage, tandis que les petits côtés, perpendiculaires aux précédents, passent, l'un par un piton trachytique, qui a reçu le nom de *Sombrero Montado*, l'autre par les gisements d'albâtre situés un peu à l'est du ravin de l'*Infierno*. (Pl. X, fig. 1.)

La topographie de ce rectangle est extrêmement simple : il est constitué par un vaste plateau d'une régularité remarquable, légèrement incliné vers la mer, et profondément découpé par de grands ravins sensiblement perpendiculaires à la côte, ravins dont les quatre princi-

paux ont reçu les noms de : *Providencia*, *Purgatorio*, *Soledad* et *Infierno*.

La ligne de plus grande pente de ce plateau est orientée N. 65° E. et son inclinaison sur l'horizon est de 2 à 3 degrés seulement, de telle sorte que l'altitude moyenne de la surface du plateau s'abaisse depuis 300 mètres, dans le voisinage de la faille, jusqu'à 70 mètres environ au bord de la mer.

Quelques rares pitons isolés (Sombrero-Montado, Juanita, etc.), s'élèvent brusquement au-dessus de ce vaste plateau, qui se raccorde insensiblement, au nord-ouest, avec les pentes du volcan des Trois-Vierges et celles du grand massif de Santa Maria, tandis qu'au sud-ouest et à l'ouest, il se rattache à la Sierra de las Lagonitas, la plus orientale des rides constituant l'axe de la Basse-Californie.

Le climat particulièrement salubre de cette région est caractérisé par son extrême sécheresse. Les pluies y sont exceptionnelles; aussi les vallées, entièrement privées de cours d'eau, ne renferment-elles que des sables et des graviers, qui supportent, pour toute végétation, quelques cactus géants et un arbuste privé de feuilles, désigné sous le nom caractéristique de *Palo Verde*.

A l'exception d'une petite source, presque toujours tarie et située vers l'embouchure de la vallée de Santa Rosalia, l'eau superficielle fait absolument défaut; en revanche, quelques puits foncés en divers points des vallées semblent démontrer l'existence d'une nappe d'eau souterraine, dont le niveau hydrostatique part de la surface de la mer et se trouve à la profondeur de 100 mètres, dans le voisinage de la grande faille de l'ouest. Salée près de la côté, cette nappe d'eau devient de plus en plus douce et elle est finalement propre à tous les usages domestiques, dès que l'on s'élève dans les vallées à 4 kilomètres environ de la mer.

Les voies de communication de la région du Boleo sont absolument rudimentaires; elles se réduisent à quelques chemins à peine ébauchés, qui ont été en quelque sorte tracés naturellement dans les vallées par le passage des mules transportant les minerais, et à des sentiers étroits et abrupts qui relient les centres du travail d'une vallée à l'autre en franchissant les plateaux, sentiers dont le plus important rattache le district minier à la petite ville de Muleje, chef-lieu de la municipalité.

La population, extrêmement clairsemée et due presque entièrement à l'immigration récente, provoquée par le travail des mines, est en totalité composée d'Indiens au type sémitique accentué, et se rattachant à la tribu des Yaquis.

Cette race, chrétienne depuis le XVIIe siècle, présente des qualités remarquables au point de vue de la résistance à la fatigue et de l'aptitude aux travaux souterrains les plus pénibles.

II. DESCRIPTION GÉOLOGIQUE.

A. GÉNÉRALITÉS.

La constitution géologique du plateau du Boleo est en harmonie complète avec sa structure topographique, et présente, comme cette dernière, autant de simplicité que de régularité. Elle est mise en évidence, avec une clarté parfaite, par les profondes découpures que font dans le plateau les quatre grands ravins mentionnés plus haut, découpures qui donnent autant de coupes géologiques dont aucune végétation, aucun manteau de terrains de transport, autre que des éboulis toujours limités, ne viennent masquer la netteté. Ces coupes sont sensiblement identiques entre elles et montrent que le sol du plateau est principalement formé d'assises sédimentaires peu puissantes, régulièrement superposées.

La succession de ces assises est la suivante, en allant de haut en bas :

Tuf à couleur dominante jaunâtre, quelquefois un peu calcaire . .	10 à 30^{m}
Conglomérat à ciment calcaire fossilifère.	2 à 4^{m}
Tufs jaunâtres ou gris-lilas.	15 à 20^{m}
Première couche cuivreuse. . . . . (en moyenne)	1^{m}
Conglomérat à élément prédominant de roche vitreuse.	3 à 4^{m}
Tufs argileux, gris-lilas, exceptionnellement jaunes ou roses . . .	40 à 50^{m}
Deuxième couche cuivreuse.	$0^{m}80$ à $2^{m}30$
Conglomérat à éléments principalement gris.	4 à 5^{m}
Tufs argilo-schisteux, parfois un peu cristallins	6 à 8^{m}
Tuf compact, gréseux d'un rouge vif, formant un horizon caractéristique.	1^{m}
Tufs rosés, quelquefois gris-lilas, passant au brun vers la base. .	45^{m}
Troisième couche cuivreuse	$0^{m}60$ à 3^{m}
Conglomérat et tuf à éléments prédominants de dacite et de labradorite..	3^{m}
Tufs de plus en plus cristallins, bruns ou verdâtres, visibles seulement dans le voisinage des pitons trachytiques	50^{m}

A côté de ces assises stratifiées, surgissent quelques roches éruptives qui forment une double chaîne discontinue parallèle à la côte, et dont la plus occidentale termine, dans cette direction, la région métallifère. Ce sont des trachytes peu acides, voisins des dacites, contre lesquels les couches viennent s'appuyer, ainsi que nous le verrons dans un instant.

Les tufs cristallins brun-verdâtres, qui forment la base de tout le système, renferment probablement une *quatrième couche cuivreuse*. Tout au moins a-t-on rencontré dans un puits voisin de la mine du *Porvenir*, une couche d'oxyde de fer et de manganèse, reposant directement sur le trachyte. D'autre part, dans les ravins situés à l'ouest des travaux de *La Ley*, on constate des lambeaux disloqués d'une couche cuivreuse que quelques ingénieurs regardent comme distincte de la troisième.

Enfin une récente exploration du ravin de l'Olvido a rencontré, au milieu des schistes cristallins de la base, une couche fortement imprégnée de minerais cuivreux, reposant sur une dolomie fossilifère, partiellement silicifiée et contenant des mouches de galène et de pyrite cuivreuse.

L'ensemble de toutes ces formations est couronné par une puissante coulée de lave basaltique à péridot, qui forme un manteau discontinu recouvrant les pitons éruptifs et débordant sur les plateaux formés par les assises stratifiées.

Nous allons maintenant examiner en détail la composition de ces différents éléments constitutifs de la région du Boleo.

B. TERRAINS STRATIFIÉS.

Comme on l'a vu dans la coupe précédente, les terrains stratifiés du Boleo se composent de trois groupes d'assises différentes : les tufs, les minerais de cuivre et les conglomérats.

1. Tufs.

Les tufs sont argileux et légèrement feldspathiques, avec de fines paillettes de mica. Ils présentent toutes les nuances comprises entre le gris-jaunâtre et le rose-vif. La couleur jaunâtre domine dans le groupe des tufs supérieurs ; le lilas et le rose sont caractéristiques de la zone médiane ; enfin, tout à la base, les couleurs sont un peu plus foncées, et l'on voit apparaître des lits d'un rouge brun passant parfois au brun verdâtre. Tous ces tufs, et principalement ceux qui sont compris entre la deuxième et la troisième couche cuivreuse, sont plus ou moins imprégnés de petits cristaux de gypse, dont l'importance va en croissant vers le nord-est et qui se réunissent en lits continus et en lentilles aplaties dans la vallée de l'Infierno.

La cristallinité augmente de haut en bas. Elle s'accentue également à mesure que l'on se rapproche des massifs et des pitons trachytiques, et finalement elle atteint son maximum dans les couches tufacées inférieures au troisième niveau cuivreux.

Vers la partie supérieure, au contraire, le faciès argileux domine, et les tufs qui sont situés au-dessus du dernier conglomérat se chargent de calcaire et passent insensiblement à des argiles marneuses. Enfin, nous devons mentionner la présence de faibles quantités de cuivre dans quelques-uns des lits tufacés compris entre la deuxième et la troisième couche de ce minerai et celle de la silice pulvérulente ou grumeleuse dans les tufs voisins de ces deux mêmes couches.

Cet ensemble d'assises tufacées est donc, par excellence, le produit d'éruptions boueuses sous-marines, dont l'intensité a été en s'atténuant de bas en haut, et qui finalement ont été accompagnées de sources calcaires, dont l'arrivée a coïncidé avec le retour de la vie animale dans les mers peu profondes où les éruptions avaient eu lieu.

Les fossiles, principalement des *Cérites*, des *Pecten*, des *Cardium* et autres bivalves littoraux, sont spécifiquement différents des espèces européennes; mais leurs formes permettent de les rapporter sans hésitation à la période miocène, ou au commencement de la période pliocène, c'est-à-dire à une époque relativement récente. Les strates qui forment la région du Boleo sont donc elles-mêmes miocènes, et se sont déposées au fond d'une mer peu profonde, dans le voisinage plus ou moins immédiat d'une plage.

2. Couches cuivreuses.

a. *Description des couches cuivreuses.* — Les assises au milieu desquelles apparaissent les minerais cuivreux présentent une série de caractères communs et ne sont différenciées que par des détails n'exerçant jamais qu'une influence insignifiante ou secondaire sur leur utilisation industrielle.

Le cuivre se présente au-dessus du niveau hydrostatique, dans les trois couches, sous forme de minerais oxydés, tantôt isolés, tantôt associés ou combinés à d'autres substances telles que le fer, le manganèse, l'acide carbonique, et, à un degré moindre, la silice.

Ce sont l'*oxyde noir* et l'*oxydule de cuivre* avec l'*atacamite* ($CuCl + 3CuO + 3HO$) comme rareté minéralogique, puis le cuivre carbonaté, tantôt bleu *(azurite)*, tantôt vert *(malachite)*; enfin, mais avec une fréquence beaucoup moindre, l'hydrosilicate de cuivre *(chrysocole)* en masses amorphes, bleues ou vertes.

A ces espèces minérales simples s'en joignent d'autres, offrant des combinaisons complexes entre les composés divers du cuivre, du fer et du manganèse; ce sont d'abord des oxydes analogues à la *Crednérite* ($2Mn^2O^3\ 3CuO$), mais où une partie du manganèse est remplacée par du fer; puis la série complexe des hydrosilicates, analogues à la *Wénérite*, ou *chlorite cuivreuse*, dont le terme extrême est une argile jaunâtre avec mouches de cuivre natif, d'oxydule et de carbonate de cuivre, et qui, à cause de sa facile décomposition par les acides, est peut-être simplement un mélange d'argile magnésienne avec les oxydes de fer et de cuivre.

Tous ces types de minerais se présentent dans les couches au milieu d'une gangue tufacée ou argileuse, qui est d'un gris-lilas assez clair quand la couche ne renferme aucune humidité, et sur laquelle les oxydes

de cuivre, plus foncés, tranchent avec une grande netteté. Cette gangue d'argile tufacée renferme de 0,1 à 6 0/0 de chlorure de sodium, et une proportion variable de carbonate et de sulfate de chaux, ce dernier allant en augmentant à mesure qu'on se dirige vers le nord-est.

Les relations du minerai avec sa gangue varient fort peu d'une couche à l'autre. Le minerai se présente sous forme de mouches ou de veinules et quelquefois à l'état de petites boules oolithiques, les unes et les autres étant irrégulièrement disséminées dans la hauteur de la couche; mais une concentration marquée a toujours lieu vers la base, où le plus souvent le minerai forme un lit compact, dont la puissance atteint de 15 à 25 centimètres.

A côté de ces caractères communs, chacune des trois couches présente des particularités qu'il importe de signaler.

Nous dirons peu de chose de la première couche, que nous n'avons étudiée qu'accidentellement, et qui paraît d'ailleurs la moins riche des trois. Les minerais y sont surtout à l'état d'oxydes, tandis que les carbonates, comme les silicates, y sont exceptionnels.

La seconde couche présente deux particularités : tout d'abord la proportion de silice qu'elle renferme est un peu plus forte, et c'est elle surtout qui renferme les variétés silicatées, bleues ou vert-pâle, que nous avons déjà mentionnées. Cette richesse en silice paraît s'accentuer dans le voisinage de la grande faille de l'ouest, dont la formation a été suivie d'une venue geysérienne siliceuse, sur laquelle nous aurons occasion de revenir plus tard.

Enfin, c'est presque exclusivement dans cette deuxième couche que le minerai cuivreux se présente sous la forme oolithique, c'est-à-dire sous la forme de petites boules plus ou moins régulières d'oxyde et de carbonate de cuivre, dont le diamètre atteint parfois plusieurs centimètres, et qui ont la structure zonée des oolithes ferreuses. Ces oolithes, auxquelles on a donné le nom de *Boleos*, sont irrégulièrement disséminées dans un tuf argileux, pauvre ou même stérile et constituent un minerai précieux, puisque leur teneur en cuivre s'élève à 35 et même à 40 0/0.

Or, il est en général facile de séparer ces oolithes cuivreuses de leur gangue, soit par un simple criblage à sec, quand la matière a séjourné un temps assez long à l'air pour permettre à l'argile de tomber en poussière, soit par un trommelage humide et systématique, si on veut les traiter immédiatement à leur sortie de la mine, l'une ou l'autre de ces deux opérations permettant d'obtenir un minerai enrichi d'une teneur moyenne de 25 à 30 0/0.

La troisième couche renferme la totalité des espèces minérales signalées au Boleo. C'est elle qui fournit les argiles jaunes, si peu métallifères en apparence, dont la teneur varie de 10 à 15 0/0; les composés de cuivre et

manganèse, voisins de la *Crednérite*, dont la teneur s'élève de 32 à 43 0/0; enfin les amas d'oxyde noir, qui ne contiennent pas moins de 60 0/0 de cuivre. Mais la constatation la plus importante est celle de la présence d'une certaine proportion de deux minerais sulfurés de cuivre, la *chalcosine* (Cu^2S) tenant 75-80 0/0 de métal, et la *covelline* (CuS) contenant 60 0/0 de cuivre. Ces deux minerais ont été signalés dans la région où la troisième couche est située au-dessous du niveau hydrostatique des eaux, et leur apparition, concentrée jusqu'ici dans les nouveaux travaux de la mine Huyar, a été regardée, par quelques ingénieurs, comme le point de départ d'une substitution graduelle qui finirait par ne plus laisser dans la couche que des minerais sulfurés. Nous ne pouvons partager entièrement cette manière de voir. Elle revient, en effet, à considérer le gîte tout entier comme ayant été constitué ordinairement par des sulfures, dont les oxydes, les carbonates et même les silicates ne seraient que des modifications ultérieures, dues aux agents atmosphériques.

Or, cette genèse du gîte, par voie d'oxydation de minerais sulfurés, nous paraît difficilement compatible avec l'existence même des Boleos qui, comme les oolithes ferrugineuses dont ils sont les équivalents rigoureux, ne sauraient, à cause de leur structure même, dériver des sulfures par voie d'épigénie.

Une observation analogue s'applique aux silicates complexes de cuivre, de fer et de manganèse, et encore, dans une certaine mesure, aux composés du cuivre et du manganèse, dans lesquels ce dernier joue le rôle d'acide.

Enfin nous devons signaler, au nord et au nord-est de la région métallifère, la présence de puissants dépôts de sulfate de chaux, qui, dans le ravin de Santa Maria et dans celui de l'Infierno, forme des couches tantôt cristallines, tantôt saccharoïdes (albâtre), et présentant encore, à leur base, le mélange caractéristique de gypse, de minerai de manganèse légèrement cuivreux, et d'oxydes de fer subordonnés.

Que cette couche soit l'équivalent de la troisième zone cuivreuse, comme on le pensait lors de notre visite, ou qu'elle lui soit supérieure, il est certain que le soufre qu'elle renferme s'est déposé à l'état oxydé qu'il affecte actuellement, et que cet état ne saurait être considéré comme le produit des agents atmosphériques.

Il est donc probable que, dans le gîte du Boleo, comme dans ses congénères en tant qu'éruptions boueuses sous-marines, et comme dans une partie des sources minérales actuelles, les minéraux oxydés étaient associés aux minerais sulfurés, et que, si ces derniers ont été partiellement transformés en oxydes, lors de leur dépôt même, par l'action chlorurante des eaux de la mer, enfin s'ils ont finalement disparu tout à fait, par l'action lente des eaux atmosphériques, au-dessus du niveau

hydrostatique de la contrée, ils seront tout au plus, au-dessous de ce niveau, les compagnons des minéraux oxydés, ces derniers constituant toujours le remplissage fondamental du gîte.

b. *Cubage des couches cuivreuses.* — Il est intéressant de rechercher quelle est l'importance de ces couches cuivreuses et dans quelle mesure, par suite, elles pourront fournir un appoint durable à l'alimentation de la métallurgie et du marché de cuivre.

Le cubage des gîtes du Boleo peut se faire à deux points de vue différents : On peut, en premier lieu, mesurer la surface totale sur laquelle règnent effectivement les couches, sans préoccupation aucune de leur nature et de leur utilisation possible. On obtient ainsi une évaluation que l'on peut appeler le *cubage géologique des couches.*

La seconde évaluation, plus intéressante à tous égards, consiste à essayer de déterminer les portions des couches qui sont réellement utilisables. C'est *le cubage industriel des richesses utilisables*, qui se sous-divise lui-même naturellement en cubage des ressources minérales délimitées, cubage des ressources assurées et cubage des ressources probables.

Le *cubage géologique* conduit à des chiffres extrêmement élevés. Il suffit, pour s'en convaincre, d'étudier la carte ci-jointe (pl.X, fig.1), sur laquelle les affleurem nts des trois couches ont été reportés avec soin, et de mesurer les surfaces encadrées par ces affleurements.

On obtient ainsi, pour l'ensemble des trois couches, le total formidable d'environ 100 millions de tonnes.

Le *cubage industriel* conduit naturellement à des résultats beaucoup plus modestes. Ces résultats sont néanmoins fort élevés encore. En restreignant le calcul à la troisième couche seulement, on arrive aux chiffres suivants :

Minerais actuellement délimités par les travaux de tout genre, environ	250.000 t.
Minerais assurés par les constatations faites aux affleurements, complétées par des travaux de recherche, plus de.......	2.750.000 t.
Minerais éventuels, situés sur le prolongement des parties visibles des couches, mais dont la nature est encore inconnue, et qui sont compris dans la troisième couche seulement...	Mémoire.

On voit donc que, même en restreignant le cubage aux minerais de la troisième couche cuivreuse dont l'existence et la nature sont déterminées dès aujourd'hui, on arrive, pour les ressources assurées du gîte du Boleo, au chiffre élevé de 3,000,000 de tonnes.

c. *Nature et composition des minerais cuivreux.* — La nature et la composition des minerais de la troisième couche cuivreuse ont été déterminées par les analyses ci-jointes, faites sur les prises d'essai systématiques

prélevées par MM. Cumenge et de la Bouglise, à l'intérieur des principales mines installées sur cette couche, au-dessus du niveau hydrostatique.

TABLEAU DES ANALYSES FAITES A L'ÉCOLE DES MINES DE PARIS SUR LES MINERAIS DU BOLEO

NOMS DES SUBSTANCES.	MINE de l'Olvido.	MINE Huyar.	MINE Sontag.	MINE Bom-pland.	MINE Emma.	MINE Prospe-ridad.	MOYENNE de 180 prises d'essai faites dans toutes les mines.
Silice.	23.00	16.80	16.30	22.60	25.00	28.00	22.00
Alumine	10.60	8.80	7.00	10.00	12.08	14.30	10.50
Peroxyde de fer. . . .	12.00	14.00	8.00	10.00	3.80	4.00	8.65
Oxyde rouge de manganèse	9.66	22.00	24.00	11.00	15.00	7.00	14.75
Carbonate de chaux. .	—	—	4.00	3.00	2.00	2.00	1.85
Sulfate de chaux . . .	0.55	—	—	—	2.50	1.30	0.55
Oxyde de plomb . . .	traces.	0.25	—	—	—	—	traces.
Oxyde de zinc.	0.60	1.80	—	—	—	1.20	0.60
Oxyde de cuivre. . . .	26.60	15.60	15.83	20.74	15.00	19.00	18.45
Chlorure de sodium . .	6.40	0.16	0.20	0.50	5.10	0.83	2.20
Perte par calcination .	10.00	20.30	24.00	22.00	10.00	22.00	19.55
TOTAL. . .	99.41	99.71	99.33	99.84	99.45	99.63	99.10
Cuivre métallique °/o .	21.28	12.48	12.66	15.59	12.00	15.20	15.00

L'analyse a, de plus, constaté l'absence totale d'arsenic et d'antimoine, ainsi que celle des métaux précieux dans les minerais oxydés. En revanche, des essais récents semblent indiquer, dans les minerais sulfurés, une proportion variable d'argent.

Ces analyses montrent que les minerais de cuivre du Boleo sont d'une pureté exceptionnelle; ils ont, de plus, l'avantage de pouvoir être traités directement pour *cuivre noir* au four à manche à enveloppe hydraulique, (Water-Jacket), sans addition d'aucun fondant, la quantité d'oxygène contenue dans la silice étant sensiblement égale à celle des bases scorifiables, ce qui permet d'obtenir, dans la fonte réductive, une scorie dont la composition est voisine de celle des protosilicates. En même temps que le cuivre noir, il se formera une proportion plus ou moins élevée de *matte cuivreuse*, due à la présence des minerais sulfurés au-dessous du niveau hydrostatique et surtout à la réduction du sulfate de chaux, comme cela a lieu dans le traitement des minerais similaires de la Sonora et de l'Arizona.

3. Conglomérats.

La troisième espèce d'assises qui concourt à la constitution du plateau du Boleo possède, à l'inverse des précédentes, une origine essentiellement clastique. Ce sont des conglomérats, des poudingues et des grès plus ou

moins grossiers, composés de fragments roulés de roches empruntées aux terrains déjà émergés au-dessus de la mer dans laquelle s'effectuaient les dépôts. Ces conglomérats ne sont pas distribués d'une manière arbitraire dans l'ensemble des terrains; ils s'y trouvent à quatre niveaux seulement et, sauf le plus élevé, ils sont tous surmontés par l'une des trois couches tufacées renfermant les minerais de cuivre.

Les éléments dont se composent ces conglomérats sont exclusivement empruntés à des roches éruptives. Ils varient d'une couche à l'autre et vont en se compliquant de bas en haut. Dans le conglomérat inférieur, on trouve surtout des *dacites* et des *labradorites*, peu différentes de celles qui forment l'ossature principale des pitons trachytiques de l'ouest. Dans le deuxième et dans le troisième conglomérat, on voit apparaître quelques trachytes plus riches en quartz, notamment un trachyte rouge, avec sanidine cristallisée et quelques rares cristaux de quartz et d'amphibole dans une pâte feldspathique rougeâtre, enfin exceptionnellement quelques *rhyolites* et des tufs feldspathiques durcis, principalement des *domites*.

Dans le conglomérat supérieur, on trouve une série, aussi riche que remarquable, de roches vitreuses et même laviques qui viennent s'ajouter à toutes celles des couches précédentes. Ce sont : des basaltes clairs à cristaux peu distincts de péridot, des phonolites, des perlites, des obsidiennes, généralement vitreuses et compactes, et parfois, — mais plus rarement, — scoriacées et bulleuses.

C. ROCHES ÉRUPTIVES.

Les éléments rocheux dont se composent les conglomérats ont été évidemment empruntés à des massifs éruptifs qui formaient des îlots au milieu des mers où ces conglomérats se sont déposés, ou qui en constituaient les rivages. Il semblerait donc, au premier abord, que l'on devrait trouver, au Boleo, sous forme de pitons, de massifs ou de coulées, la totalité des types de roches représentées dans les conglomérats. Il n'en est rien, et nous n'avons guère constaté, dans les massifs de l'ouest, que deux roches assez constantes : l'une formant l'ossature principale des massifs; l'autre constituant la coulée supérieure, irrégulièrement répandue sur le plateau.

La première est une *labradorite* à texture fluidale, essentiellement composée de labrador avec pyroxène, englobant des cristaux brisés d'orthose maclée de première consolidation, des cristaux indistincts et rares de péridot, enfin des microlithes de fer magnétique.

La deuxième est une *lave basaltique*, claire, à cristaux abondants de péridot, quelquefois scoriacée et que nous n'avons pas eu occasion d'étudier en détail.

III. ESQUISSE GÉOGÉNIQUE.

La description que nous venons de faire des roches constitutives du Boleo, de leur nature et de leur allure respectives, nous permet de formuler avec assez de précision la géogénie de cette région. La présence de fossiles littoraux dans les couches supérieures nous a déjà montré que ces couches s'étaient déposées dans des mers peu profondes et dans le voisinage immédiat d'une plage sans doute bordée d'une ceinture plus ou moins continue d'îlots. Ces îlots sont, au moins partiellement, les pitons de roches éruptives qui limitent la région du Boleo vers l'ouest; quant à la plage, elle n'était autre chose que le massif complexe de trachytes qui forme, aujourd'hui encore, l'ossature de la chaîne centrale de la presqu'île californienne.

L'éruption de ces trachytes, si l'on en juge par leurs congénères européens, a commencé vers le milieu de la période éocène, et s'est prolongée pendant la presque totalité de la période miocène ; mais il est facile de montrer qu'elle était achevée, au moins dans ses grands traits, au moment où le groupe des tufs du Boleo a commencé à se déposer.

En effet, nous avons déjà signalé le fait que les assises formées par ces tufs étaient légèrement redressées le long de leur contact avec les petits massifs éruptifs de l'ouest. On n'en trouve aucun lambeau surmontant ces massifs, et l'on n'y constate nulle part les déchirures ou les plissements qui se fussent produits infailliblement si les trachytes s'étaient fait jour à travers les couches déjà déposées; mais l'inclinaison même de ces couches, plus grande dans le voisinage des massifs éruptifs que près de la plage, prouve que ces massifs, et avec eux la contrée tout entière, ont continué à être le théâtre de soulèvements complémentaires qui se sont produits pendant et après le dépôt des tufs stratifiés.

La présence de quatre couches de conglomérats, intercalés au milieu des tufs, montre que ces soulèvements ont été au nombre de quatre au moins, et que chacun d'eux a été suivi de mouvements de la mer assez considérables pour déterminer l'arrondissement de tous les fragments accumulés au pied du rivage.

Une autre preuve de ces soulèvements se trouve dans le fait, en quelque sorte connexe du précédent, que l'inclinaison générale des couches situées au-dessus du conglomérat inférieur, est un peu plus forte que celle des couches qui sont comprises entre ce conglomérat et le suivant, lesquelles sont elles-mêmes un peu plus inclinées que les couches superposées au deuxième conglomérat. Le même phénomène se reproduit encore, quoique avec une intensité moindre, pour les assises qui surmontent ce dernier. Enfin, celles qui couronnent toute la formation sédimentaire, et qui sont

caractérisées par la présence des coquilles marines, sont à peine inclinées sur l'horizon et présentent une discordance de stratification très nette avec les précédentes. Elles n'ont, en effet, subi que le soulèvement final qui a, sans doute, affecté la presqu'île californienne tout entière, et qui l'a fait définitivement émerger au-dessus de l'océan Pacifique, en conservant à l'ensemble des formations leur régularité et leur parallélisme.

Tous ces mouvements d'ensemble n'ont pu s'opérer sans entraîner des accidents de détail, failles et fractures de tout ordre, et l'on peut, en effet, constater l'existence de nombreuses dénivellations des strates, non seulement dans les travaux souterrains et principalement dans ceux qui sont voisins de la région des trachytes, mais encore à la surface même, dans les grands escarpements qui encadrent les vallées; on peut citer notamment, sous ce rapport, la série des failles avec rejets recoupant, avec tant de netteté, la haute falaise qui surmonte les vieux travaux de la mine Huyar dans la vallée de Providencia, à 4 kilomètres environ de la mer.

Ici encore, la trace des quatre soulèvements se fait nettement sentir. Ce sont les assises du groupe inférieur qui sont le plus fréquemment et le plus fortement affectées par les fissures secondaires, les couches superposées aux conglomérats supérieurs n'étant que rarement et toujours faiblement disloquées.

Naturellement aussi, ces fissures ont leur maximum d'intensité dans le voisinage des îlots trachytiques anciens, et elles ont produit, tout à l'entour de ces îlots, dans les couches imprégnées de cuivre, et principalement dans la troisième, des dénivellations assez considérables pour qu'il soit quelquefois assez difficile de réunir par la pensée les lambeaux ainsi déchiquetés.

C'est ce que l'on observe notamment dans les collines situées en face de la mine du *Porvenir*, où les affleurements de la troisième couche semblent former une série double, cette allure apparente s'expliquant par un faisceau de failles parallèles à la vallée, laquelle, en ce point, a sans doute épousé elle-même un élément de fracture.

Le même phénomène se reproduit encore, avec une intensité plus considérable, dans les ravins situés à l'ouest de la mine *Emma*, où la troisième couche est si fortement disloquée et rejetée, que l'on a pu en considérer le fragment occidental comme une couche distincte, située en contre-bas d'une cinquantaine de mètres environ.

Enfin, des phénomènes analogues s'observent dans le massif qui sépare les vallées de la Providencia et du Purgatorio et dans la vallée de la Soledad qui aboutit au pied des mines de l'*Amalia* et de l'*Olvido*.

Dans le premier, une grande faille, orientée sensiblement du nord au sud, relève brusquement la première couche cuivreuse au sommet du contrefort qui termine le massif et ramène, au-dessus du niveau de la

vallée, la deuxième couche cuivreuse qui avait disparu sous les alluvions, à 2 kilomètres de ce point, un peu en aval des mines Patti et Bompland.

Il est à remarquer que dans le voisinage de cette faille, et principalement sur le flanc gauche de la vallée du Purgatorio, apparaît un massif trachytique grossièrement stratifié, qui a dû former un îlot au milieu des mers où se sont effectués les dépôts, puisqu'il est directement surmonté par le groupe des couches qui encadrent le deuxième niveau cuivreux ; il a, d'ailleurs, été affecté, lui aussi, par les phénomènes de dislocation et de soulèvements secondaires, puisqu'il est relevé en même temps que la deuxième couche cuivreuse qu'il supporte.

Dans la vallée de la Soledad, trois failles principales, au moins, affectent la troisième couche cuivreuse et elles ont pour effet : la première, de relever le gîte dans les travaux de l'*Amalia*, la deuxième, de faire affleurer cette couche deux fois sur les flancs du ravin : une première fois, à la hauteur de la Fortuna; une deuxième, moins distincte il est vrai, dans un ravin de droite situé 1,500 mètres environ plus bas.

Mais il est un accident qui prime, et de beaucoup, par son importance, toutes les petites fissures de détail que nous venons d'énumérer. C'est une grande fracture, qui est parallèle, dans son ensemble, à la ligne du rivage distante de 6 kilomètres, et dont l'orientation varie entre nord 40° ouest et nord 65° ouest. Tout le terrain, situé à l'ouest de cette faille, est abaissé en moyenne de 70 mètres (le rejet atteint 110 mètres dans le haut de la vallée de Providencia), en sorte que, dans la partie abaissée, la deuxième couche cuivreuse arrive presque au niveau des vallées, et que la troisième est rejetée à plus de 50 mètres au-dessous de ces dernières.

L'ensemble de tous ces phénomènes de soulèvement et de fracture a-t-il été purement mécanique, ou bien a-t-il été complété par l'arrivée au jour de roches éruptives ? On ne saurait douter de cette arrivée, bien que ces roches ne soient, en général du moins, pas visibles à l'intérieur du district métallifère du Boleo. Mais leur existence et leur présence dans le massif éruptif axial ne sauraient faire l'objet d'aucun doute, à cause de la circonstance, déjà mentionnée, que les éléments des conglomérats, qui ne sont autre chose que des fragments empruntés à ce massif alors qu'il surgissait au-dessus de la mer miocène, sont variables d'un conglomérat à l'autre.

Les roches trachytiques proprement dites existent seules, ou à peu près, dans le conglomérat inférieur, tandis qu'elles sont associées à un nombre croissant de roches vitreuses proprement dites dans les conglomérats suivants. Toutes ces roches ont donc dû se faire jour dans la chaîne centrale de la presqu'île californienne, et l'on doit retrouver, dans l'axe de cette chaîne, une succession de dacites, de trachytes feldspathiques, de domites, de phonolites, de perlites, d'obsidiennes, ayant sans doute apparu dans le même ordre et aux mêmes époques que leurs congénères

des massifs de l'Auvergne, du Sieben-Gebirg, des Apennins et du Caucase.

Mais si ces roches éruptives font défaut dans le plateau du Boleo, elles y sont représentées par des matières d'émanation d'une origine essentiellement filonnienne, et qui doivent leur être rattachées d'une façon tout à fait intime. Ce sont les trois gîtes cuivreux qui sont régulièrement superposés à chacun des trois conglomérats inférieurs et dans lesquels les minerais métalliques ont pour gangue des argiles magnésiennes également d'origine éruptive. Ces gîtes sont le pendant exact de ceux des Apennins, de la Sonora et de l'Arizona, qui apparaissent, eux aussi, au milieu d'argiles stéatineuses et serpentineuses, elles-mêmes liées à de puissantes éruptions de roches magnésiennes, gabbros, serpentines et euphotides.

La seule différence entre ces deux groupes de gîtes, c'est que les uns sont sortis au milieu de massifs éruptifs déjà émergés et qu'ils affectent, par suite, la forme d'amas, de dykes et de filons, tandis que les gîtes du Boleo ont eu leurs points d'émergence au pied des massifs éruptifs de la presqu'île californienne, au-dessous du niveau de la mer et dans le voisinage de la rive. Ils se sont présentés, par suite, sous la forme d'éruptions boueuses sous-marines et constituent un des exemples les plus complets de ces gîtes, si précieux par leur régularité et leur continuité, qui ont le double caractère de l'éruptivité, quant à leur origine, et de la sédimentation, quant à leur forme, à leur mode de dépôt et à leur extension.

On peut rapporter à ce type de gîtes la plupart des formations métallifères de premier ordre ; nous citerons seulement : les puissantes couches d'oxyde de fer imprégné de minerais de plomb et de zinc, situées à la base du terrain jurassique du Gard ; celles de composition analogue placées au-dessous du calcaire permien de Carthagène ; les vastes dépôts de minérais de fer oolithique compris entre le Lias et l'Oolithe inférieure de la Moselle et du Cleveland ; les schistes permiens imprégnés de minerais de cuivre du Mansfeld ; les grès plombifères triasiques de la Sarre et des bords du Rhin, et les grès du même âge, imprégnés de cuivre natif, qui forment les minerais si purs de Corocoro au Chili. Mais l'équivalent européen rigoureux du Boleo est le gîte de Capo Rosso (Sardaigne) formé d'une couche de manganèse légèrement cuivreux, régulièrement comprise entre un trachyte cristallin et un tuf trachytique bréchiforme.

Postérieurement à tous ces phénomènes de soulèvement partiels et d'éruptions ignées et hydrothermales, et couronnant toute la région, sont venues d'énormes coulées de laves vitreuses basaltiques ayant sans doute leur origine dans le volcan des Trois-Vierges. Ces laves correspondent à l'émersion définitive du plateau du Boleo, et sont venues recouvrir ce dernier d'une nappe irrégulière, qui, en certains points, s'avance jusqu'au voisinage même de la mer (rive droite de l'Infierno).

Les petites fractures secondaires, qui morcèlent les couches dans le détail,

ne paraissent pas avoir été accompagnées de matières d'origine éruptive. Toutefois la grande faille terminale de l'ouest a donné passage à des eaux geysériennes riches en quartz, qui ont plus ou moins silicifié les assises sédimentaires et même les roches éruptives qui forment les deux lèvres de cette faille.

Cette circonstance nous permet d'affirmer que la formation de la faille terminale est venue clore la série des phénomènes géologiques qui ont affecté la contrée. Il faut en excepter toutefois le creusement des vallées, qui s'est produit au début de la période quaternaire, et qui s'est brusquement arrêté à l'ère actuelle, la pluie ayant à de rares exceptions près, cessé de tomber depuis des siècles sur la presqu'île californienne.

IV. RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

Nous pouvons maintenant nous faire une idée fidèle de la série des phénomènes géologiques dont le Boleo a été le théâtre et qui se résument de la manière suivante :

Formation de l'arête centrale de la péninsule sous la forme d'une chaîne complexe de trachytes, vers la fin de l'époque éocène et au commencement de l'époque miocène.

Épanchement sous-marin, pendant la période miocène et au commencement de la période pliocène, de tufs feldspathiques et argileux constituant des éruptions boueuses qui se sont étalées, sous forme de couches régulières, sur le fond d'une mer peu profonde.

Interruption, à quatre reprises différentes, de cette période de calme par des soulevements de second ordre, accompagnés de venues de roches, d'abord trachytiques, puis vitreuses (dacite, rhyolithe, phonolite, perlite, obsidienne).

Formation de quatre conglomérats, caractérisant la fin de ces trois soulèvements partiels et caractérisant le début des périodes de calme subséquentes, la formation du dernier ayant coïncidé avec le réapparition de la vie dans les mers tertiaires de cette région.

Éruptions hydrothermales et métallifères, cuivreuses, ferreuses et manganésées, inaugurant le retour des éruptions sous-marines boueuses caractéristiques de chacune des périodes de calme.

Exhaussement complet et définitif de tout le plateau du Boleo, et formation du cratère de soulèvement des Trois-Vierges.

Épanchement par ce cratère, ou par des fissures et des cratères adventifs, de la grande nappe de basaltes vitreux qui couvre les sommets et s'étale sur la partie nord-ouest du plateau.

Dénudation partielle du plateau par les phénomènes diluviens.

Creusement des vallées et constitution de l'orographie actuelle.

PARIS, IMPRIMERIE CHAIX (S.-O.). — 10946-6.

GITE CUIVREUX DU BOLEO



Gravé chez L. Wuhrer, R. de l'Abbé de l'Epée. 4.

Mr Ed. FUCHS ___ SUR LES GISEMENTS DE CUIVRE DU BOLEO

Imp. Monrocq, Paris.

ASSOCIATION FRANÇAISE

POUR L'AVANCEMENT DES SCIENCES

EXTRAIT DES STATUTS ET RÈGLEMENT

STATUTS

Art. 4. — L'Association se compose de membres fondateurs et de membres ordinaires; les uns et les autres sont admis, sur leur demande, par le Conseil.

Art. 6. — Sont membres fondateurs les personnes qui auront souscrit, à une époque quelconque, une ou plusieurs parts du capital social : ces parts sont de 500 francs.

Art. 7. — Tous les membres jouissent des mêmes droits. Toutefois, les noms des membres fondateurs figurent perpétuellement en tête des listes alphabétiques, et les membres reçoivent gratuitement, pendant toute leur vie, autant d'exemplaires des publications de l'Association qu'ils ont souscrit de parts du capital social.

RÈGLEMENT

Art. 1er. — Le taux de la cotisation annuelle des membres non fondateurs est fixé à 20 francs.

Art. 2. — Tout membre a le droit de racheter ses cotisations à venir en versant, une fois pour toutes, la somme de 200 francs. Il devient ainsi membre à vie.

Les membres ayant racheté leurs cotisations pourront devenir membres fondateurs en versant une somme complémentaire de 300 francs. Il sera loisible de racheter les cotisations par deux versements annuels consécutifs de 100 francs.

La liste alphabétique des membres à vie est publiée en tête de chaque volume, immédiatement après la liste des membres fondateurs.

Les souscriptions sont reçues :

Au Secrétariat, 4, rue Antoine-Dubois (Place de l'École-de-Médecine).

Les souscriptions des membres fondateurs peuvent être versées en une seule fois ou en deux versements de chacun 250 francs.

PARIS. — IMPRIMERIE CHAIX (S.-O.). — 19982-6.